

## СУДНОВА ГАЗОТУРБІННА УСТАНОВКА З ТЕРМОПРЕСОРНИМ ПІДВИЩЕННЯМ ТИСКУ В КОНТУРІ ПЕРЕРОЗШИРЕННЯ

Коновалов Д.В., канд. техн. наук, доцент, Радченко М.І., д-р техн. наук, професор.,  
Бойко О.В., аспірант, Пекун О.О., магістрант  
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

*Проаналізована ефективність застосування в газотурбінній установці додаткової турбіни перерозширення, що встановлюється після основної (силової) турбіни, з наступним підвищенням тиску продуктів згоряння до атмосферного в термопресорі. Показано, що можливе істотне збільшення потужності газотурбінної установки та роботи турбіни перерозширення без підтискуючого компресора.*

*The effectiveness of application in gas turbine unit of addition turbine, mounted behind the main (power) turbine, with further increasing the pressure of combustion products up to the atmospheric pressure in the thermopressor was analyzed. The possibility to achieve a significant enhancement of gas turbine unit power and a performance of the over expansion turbine without a booster compressor has been shown.*

**Ключові слова:** газотурбінна установка, турбіна перерозширення, термопресор, компресор.

### 1. Аналіз проблеми та постановка мети дослідження

Газотурбінні двигуни широко застосовуються в стаціонарній і транспортній енергетиці, зокрема в суднової. Турбіни малої потужності (до 1 МВт) застосовуються в установках автономного енергозабезпечення та на малотоннажних суднах, зокрема на суднах на повітряній подушці в якості суднової електростанції. Так, приклад, на судні типу «Зубр» застосовуються турбіни малої потужності ГТГ-100 К (потужність 100 кВт). Енергетична установка «Зубру» складається із привідних агрегатів сумарною потужністю 40 МВт для підтримання ходу судна та автономної електростанції потужністю 400 кВт, на базі ГТГ-100К. Основною перевагою газотурбінних установок (ГТУ) порівняно з поршневими двигунами внутрішнього згоряння є можливість політропного розширення робочого тіла (продуктів згоряння) до атмосферного тиску. Одним із способів підвищення ефективності ГТУ є додаткове розширення продуктів згоряння нижче атмосферного тиску в допоміжній турбіні, яка встановлюється після основної (силової) турбіни, тобто застосування турбіни перерозширення. Отримана в турбіні перерозширення потужність витрачається на стиснення відпрацьованих газів до атмосферного тиску компресором, а надлишкова потужність (понад споживану компресором) може передаватися на гребний вал або використовуватися для приводу електрогенератора [1].

Для охолодження газу в контурі перерозширення перспективним є застосування термопресора, в якому збільшення повного тиску газу відбувається у процесі миттєвого випаровування розпиленої в ньому води [2, 3]. При цьому вода упорскується в газовий потік, який рухається зі швидкістю, близькою до звукової. Питанням теорії робочих процесів, конструювання та випробування термопресорів присвячені роботи [4–5]. В роботі [6] наведено результати теоретичного дослідження застосування термопресорного стиснення в контурі перерозширення ГТУ сумісно із додатковим охолоджувачем газу і дотискаючим компресором.

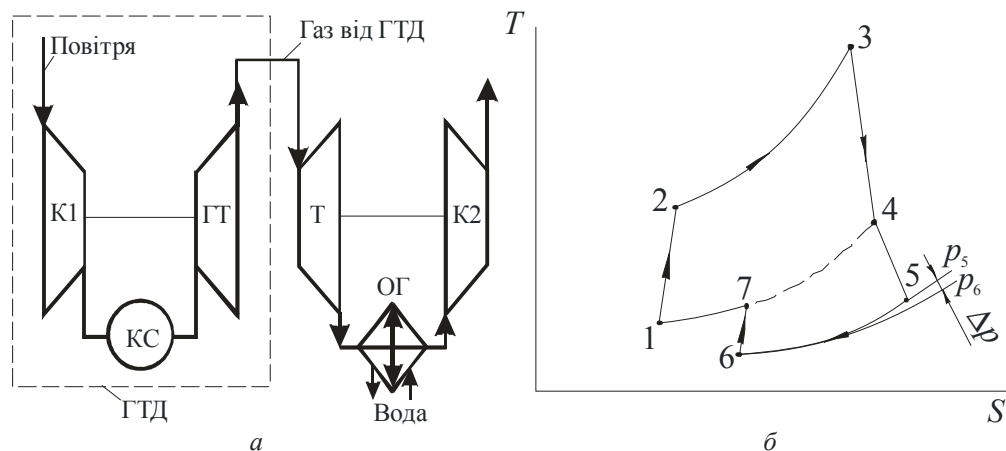
Для суден на повітряній подушці характерним є обмеженість по масі та об'єму машинного відділення (МВ), що робить встановлення додаткового габаритного обладнання вельми проблематичним. Проте термопресор є достатньо компактним апаратом, розміри якого дозволяють розміщувати його в обмеженому об'ємі МВ. Тому, вочевидь, його застосування в контурі перерозширення ГТУ, в якості компресора і охолоджувача одночасно, є доцільним.

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування термопресорного підвищення тиску в контурі перерозширення суднової газотурбінної установки.

### 2. Аналіз результатів дослідження

Схема додаткового контуру ГТУ із турбіною перерозширення і цикл такої установки наведені на рис. 1. Принцип роботи установки полягає в наступному: газ із тиском  $P_4$ , що дорівнює атмосферному, і високою температурою (400...600 °С) після ГТУ надходить на допоміжну турбіну, де політропно розширюється до тиску  $P_5 = 0,35 \cdot 10^5$  Па (процес 4–5). З метою зменшення роботи стиснення в компресорі газ охолоджують в холодильнику (процес 5–6). Внаслідок аеродинамічного опору  $\Delta P$  теплообмінного

апарата тиск  $P_6 < P_5$ . Холодний газ з температурою, наприклад,  $t_3 = 50\text{ }^\circ\text{C}$  [1] (в залежності від температури охолоджуючої середовища) стискається турбокомпресором до атмосферного тиску (політропний процес 6–7). На T–S-діаграмі (рис. 1,б) ізобарний процес 7–1, що замикає цикл є умовним.

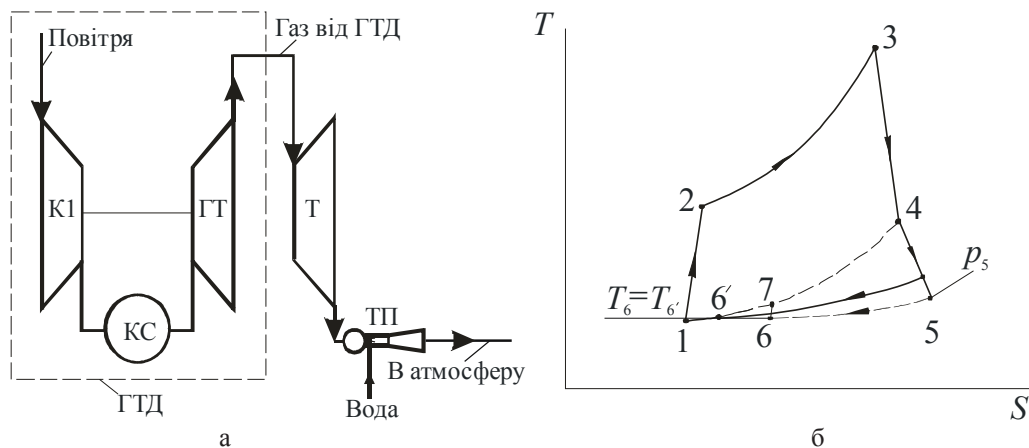


ГТ – турбіна ГТУ; КС – камера згоряння; Т – турбіна перерозширення;  
 К1, К2 – компресор; ОГ – охолоджувач газу

Рис. 1 – Схема (а) та цикл (б) установки з турбіною перерозширення

Охолоджувач газу ОГ і компресор К2 можна замінити компактним апаратом — термопресором, який поєднує одразу декілька функцій: охолодження і стиснення (рис. 2,а). Термопресор являє собою струменевий апарат, що складається із сопла і дифузора. До сопла підводиться газ з високою температурою. При витіканні з сопла тиск газу зменшується, а швидкість збільшується до швидкості, близької звуковій. У розігнаний газовий потік на виході з сопла упорскують воду форсункою тонкого розпилю. За рахунок миттєвого випаровування крапель відбувається інтенсивне охолодження газу із одночасним підвищенням тиску (термогазодинамічний ефект).

В установці з термопресорним стисненням в контурі перерозширення газ після ГТУ надходить, як і в попередньому випадку, в допоміжну турбіну Т, де політропно розширюється до тиску  $P_2$  (процес 4–5 на рис. 2, б).



ГТ – турбіна ГТУ; КС – камера згоряння; Т – турбіна перерозширення;  
 К1, К2 – компресор; ТП – термопресор

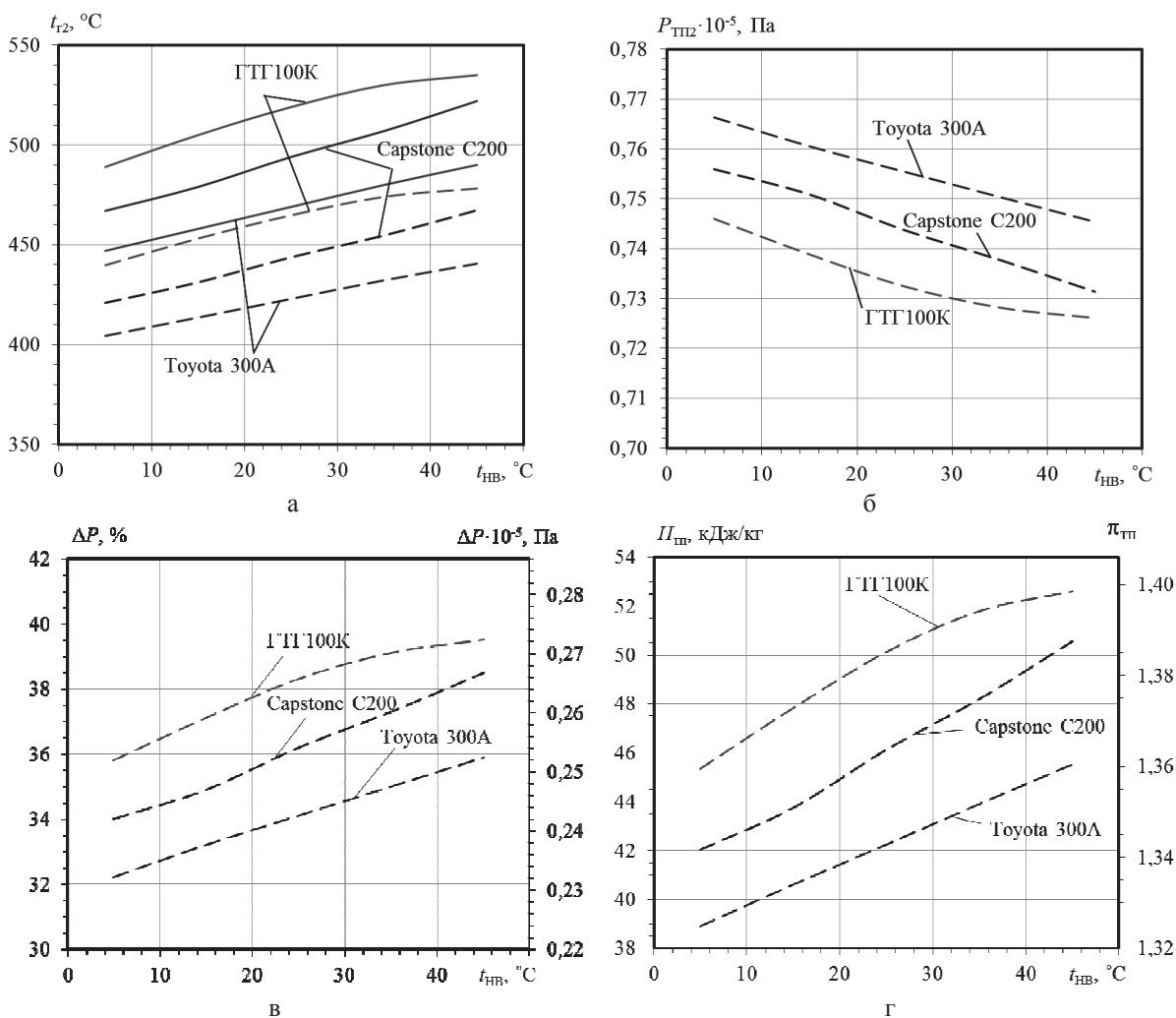
Рис. 2 – Схема (а) і цикл (б) установки з турбіною перерозширення та термопресором

У соплі термопресора газ адиабатно розширюється до більш низького тиску і політропно стискається в дифузорі апарату до тиску  $P_6' = P_{\text{атм}} > P_6$  (процес 5'–6'). Лінія 5'–6' являє собою умовний процес стиснення газового потоку в термопресорі. При забезпеченні в термопресорі такої ж глибини охолодження, як і в охолоджувачі газу, температури на виході будуть рівні:  $T_6' = T_6 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ .

Аналіз ефективності суднової газотурбінної установки з термопресорним підвищенням тиску в контурі перерозширення було проведено для ГТУ малої потужності, які можуть бути рекомендовані для встановлення на судах на повітряній подушці: ГТГ100К (НВКГ «Зоря»-«Машпроект», Україна), Capstone C200 («Capstone Turbine Corporation», США), Toyota 300A («Toyota turbine system», Японія).

Вихідні дані для розрахунку: температура і витрата газу за ГТУ приймалася відповідно до характеристик ГТУ в залежності від температури повітря на вході в компресор. Температура газу за термопресором приймалася  $t_6 = 50$  °С. Характеристики термопресора розраховувалися за розробленим програмним комплексом на основі відомих методик [3, 4].

Застосування турбіни перерозширення знижує температуру газу  $t_{r2}$  на виході з ГТУ на 50...60 °С (рис. 3, а), але тепловий потенціал відхідних газів для застосування в термопресорі досить великий: ГТГ100К ( $N_e = 100$  кВт,  $b_e = 575$  г/кВт·год) —  $t_{r2} = 440...480$  °С, Capstone C200 ( $N_e = 200$  кВт,  $b_e = 442$  г/кВт·год) — 420...470 °С, Toyota 300A ( $N_e = 300$  кВт,  $b_e = 373$  г/кВт·год) — 400...440 °С. При зниженні температури відхідних газів  $\Delta t_{ТП}$  від температури  $t_{r2}$  на вході в термопресор до 50 °С на виході можливе отримання значного збільшення тиску (рис. 3, б, в).



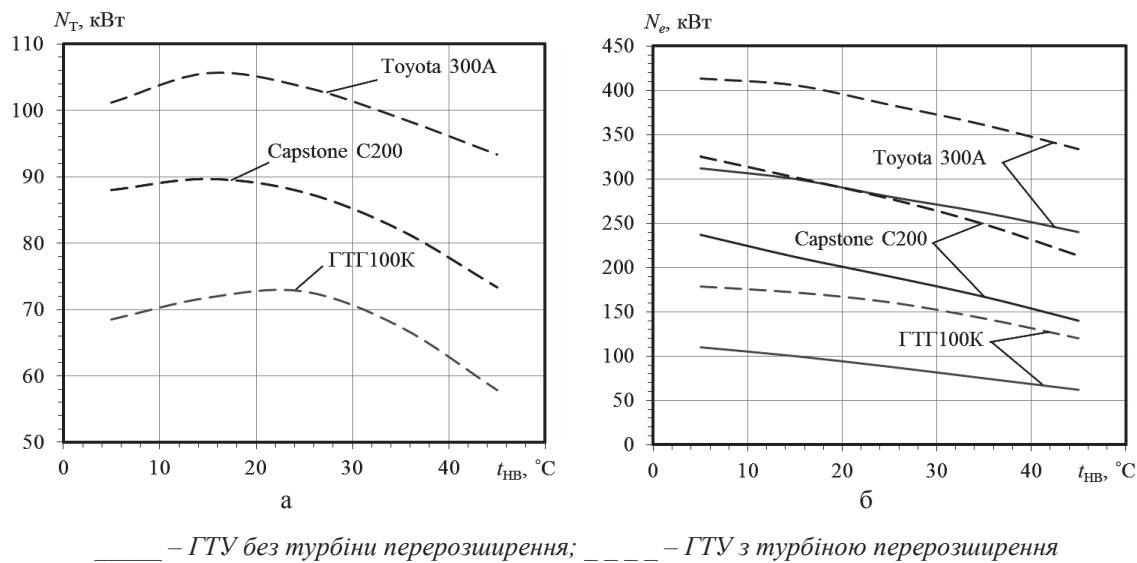
— — ГТУ без турбіни перерозширення; - - - - ГТУ з турбіною перерозширення

**Рис. 3 – Залежності температури відхідних газів за ГТУ  $t_{r2}$  (а), тиску на виході з турбіни перерозширення (вхід в ТП)  $P_{ТП2}$  (б), збільшення тиску в термопресорі  $\Delta P$  (в) і роботи турбіни перерозширення  $N_{ТП}$  та степені розширення газу в турбіні  $\pi_{ТП}$  (г) від температури повітря на вході  $t_{НВ}$  для різних типів ГТУ**

Дослідження показали, що збільшення тиску в термопресорі складає для ГТГ100К —  $\Delta P = 36...40$  %, Capstone C200 — 35...38 %, Toyota 300A — 32...36 %. Досить великий перепад тиску пояснюється,

відповідно великим перепадом температур в термопресорі, який складає  $\Delta t_{\text{ТП}} = 350 \dots 430 \text{ }^\circ\text{C}$ . Збільшення тиску в термопресорі дає змогу знизити тиск за турбіною перерозширення  $P_{\text{ТП2}}$  (рис. 3, б): для ГТГ100К — на  $0,725 \dots 0,745 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , Capstone C200 —  $0,730 \dots 0,755 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , Toyota 300A —  $0,745 \dots 0,765 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Це дозволяє збільшити степінь розширення газу в турбіні  $\pi_{\text{тп}}$  з відповідним збільшенням потужності турбіни  $N_t$  (рис. 4, а): для ГТГ100К — на  $60 \dots 70 \text{ кВт}$ , Capstone C200 —  $75 \dots 90 \text{ кВт}$ , Toyota 300A —  $95 \dots 105 \text{ кВт}$ . При температурах  $t_{\text{НВ}} = 15 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$  значення потужності максимальне, що пояснюється протилежною поведінкою показників, від яких залежить  $N_t$ : витрата відхідних газів  $G_r$  при збільшенні  $t_{\text{НВ}}$  зменшується, а температура  $t_{t2}$  збільшується з відповідним збільшенням тиску  $\Delta P$  в термопресорі.

Отримання додаткової потужності в турбіні перерозширення збільшує загальну потужність суднової ГТУ в порівнянні з базовою (рис. 4, б): для ГТГ100К — на  $25 \dots 37 \text{ кВт}$  ( $35 \dots 40 \%$ ), Capstone C200 —  $35 \dots 50 \text{ кВт}$  ( $20 \dots 25 \%$ ), Toyota 300A —  $50 \dots 65 \text{ кВт}$  ( $20 \dots 25 \%$ ). Масова доля води, що упорскується в термопресор, складає  $G_w = 0,03 \dots 0,10$ . Застосування термопресора сумісно з турбіною перерозширення більш ефективно при невеликих потужностях ГТУ (ГТГ100К), оскільки турбінам такого типу відповідають більш високі температури газу на виході  $t_{t2}$ , а відтак і більші значення  $\Delta P$ .



**Рис. 4 – Залежності потужності турбіни перерозширення  $N_t$  (а), ГТУ (б) від температури повітря на вході  $t_{\text{НВ}}$  для різних типів ГТУ**

Результати теоретичного дослідження добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими в роботах [2, 4], де наведено збільшення тиску відхідних газів ГТУ термопресором на  $10 \dots 25 \%$ .

### Висновки

1. Використання в ГТУ енергії продуктів згоряння шляхом їх розширення нижче атмосферного тиску в додатковій турбіні перерозширення, що встановлюється після основної (силової) турбіни, з подальшим підвищенням їх тиску в термопресорі забезпечує збільшення потужності ГТУ на  $20 \dots 25 \%$ .
2. Застосування термопресорного стиснення дозволяє поєднати в одному апараті (термопресорі) одразу декілька функцій: стиснення (компресор) і охолодження (охолоджувач газу), що в свою чергу, дає можливість застосувати перерозширення газу в ГТУ на спеціалізованих судах на повітряній подушці, де встановлення додаткового обладнання вельми проблематично через обмежений об'єм машинного відділення.

### Література

1. Bianchi M. A feasibility study of inverted Brayton cycle for gas turbine repowering [Текст] / М. Bianchi, G. Negri di Montenegro, A. Peretto, P.R Spina. // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2003. – Paper GT-2003-38186. – 8 p.
2. Ерофеев В.Л. Экспериментальное исследование термопресора [Текст] / В.Л.Ерофеев // Тр. ленинградского ин-та водного транспорта. Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация флота. – 1974. – вып. 147. – С. 25–30.

3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л.А. Вулис – М.:Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.
4. Степанов И.Р. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок [Текст] / И.Р. Степанов, В.И. Чудинов – Л.: Наука, 1977. – 200 с.
5. Живица В.И. Интенсификация процессов в контактных охладителях аммиачных холодильных установок [Текст] / В.И. Живица // Холодильная техника и технология. – 2002. – № 2 (76). – С. 24-28.
6. Коновалов Д.В. Газотурбинный двигатель простого цикла с турбиной перерасширения и термопресором [Текст] / Д.В. Коновалов, А.Н. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (674). – С. 98–101.

УДК 621.56/.59

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЖЕКТОРОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

**Когут В. Е. к.т.н., доц., Бутовский Е. Д. аспирант, Хмельнюк М. Г. д.т.н., проф.  
Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики,  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса**

*Применение эжекторов типа контактных струйных теплообменников позволяет эффективно использовать их в различных технологических процессах. В статье акцентируется внимание на применении данных аппаратов при решении наиболее важных актуальных задач нефтеперерабатывающей отрасли. Так же предлагается использовать жидкий инертный газ в процессах сохранения паров углеводородов, охлаждении паров хладагента в многоступенчатых промышленных холодильных установках, и в системах очистки дымовых газов на ТЭЦ и др.*

*Предлагаемые аппараты позволяют эффективно решать вопросы энергосбережения и рационального потребления топливно-энергетических ресурсов предприятий нефтеперерабатывающей отрасли. Данные схемные решения в промышленности являются приоритетным направлением политики энергосбережения.*

*Application of ejectors of type of contact jet heat interchangers allows to use effectively them in various master schedules. In a paper the attention is focused on application of the given devices at the decision of the most important actual problems of oil refining branch.*

*As it is offered to use liquid inert gas in processes of preservation of steams of hydrocarbons, refrigeration of steams of a coolant in the multiple-stage industrial refrigerating machinery, and in descaling systems of smoke gases on thermal power station, etc.*

*Offered devices allow to solve effectively questions of power savings and rational consumption of fuel and energy resources of the operations of oil refining branch. The given circuit decisions in the industry are a priority direction of a policy of power savings.*

**Ключевые слова:** термопресор, термоконденсатор, эжектор, эжекторный конденсационный фильтр, струйные аппараты, испарительное охлаждение, контактный теплообмен, электрофильтр, фильтрационный модуль, дымовые газы.

В настоящее время эжекторы, как контактные струйные теплообменники, эффективно применяются в конденсационных процессах, охлаждении паров хладагентов, в 2-х ступенчатых холодильных промышленных установках, в системах очистки дымовых газов. В данной статье рассматривается применение 3-х видов эжекторов при решении различных промышленных задач.

**Таблица 1 – Виды эжекторов теплообменников**

Эжектор теплообменник		
Термопресор (промежуточный охладитель)	Термоконденсатор эжектор	Эжекторный конденсационный фильтр

В многоступенчатых холодильных промышленных установках предлагается использование термопресора после компрессора низкой ступени для более эффективного охлаждения паров хладагента.